E/CONF.39/A/36
29 Sept. 1962
ORIGINAL : FRANCAIS

CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'APPLICATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE
DANS L'INTÉRÊT DES RÉGIONS PEU DÉVELOPPÉES

Point de l'ordre du jour : A.3.2.3

France

LA MECANIQUE DES SOLS APPLIQUEE A LA CONSTRUCTION DES PETITS BARRAGES EN TERRE

Par J. DUNGLAS,
Ingénieur du Génie Rural,
Chef de la Section de Mécanique
des Sols et Génie Civil du Centre
de Recherches et d'Expérimentation
de Génie Rural

Les mémoires rédigés à l'intention de la Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées sont des documents de travail. Ils sont publiés tels qu'ils ont été présentés et les assertions et opinions qu'ils contiennent sont celles de leurs auteurs.

NOTES

1. Les mémoires choisis pour être présentés en séance générale pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

2. Les mémoires choisis pour être présentés en séance spéciale pourront être obtenus à la Conférence dans l'une seulement de ces langues officielles.

3. Les résumés qui ont été rédigés pour tous les mémoires par les auteurs de ceux-ci pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

4. Préalablement à la Conférence, les mémoires et les résumés ne feront pas l'objet d'une distribution générale mais d'un tirage restreint destiné aux délégations des gouvernements et autres participants officiels. La publication et la distribution générale des actes de la Conférence s'effectueront conformément aux règles et pratiques agréées par le Comité des publications des Nations Unies.

LA MECANIQUE DES SOLS APPLIQUEE A LA CONSTRUCTION DES PETITS BARRAGES EN TERRE

par J. DUNGLAS, Ingénieur du Génie Rural,
Chef de la Section de Mécanique des Sols et Génie Civil
du Centre de Recherches et d'Expérimentation de Génie Rural

1 . La petite réserve . Intérêt et caractéristiques

La petite réserve obtenue en barrant par un barrage en terre de faible dimension une vallée peu profonde, est apparue depuis quelques années, comme l'une des meilleures solutions pour l'alimentation en eau d'irrigation des périmètres isolés et même, dans beaucoup de cas, pour la fourniture en eau potable de collectivités rurales.

Cette technique, très ancienne a retrouvé une nouvelle jeunesse avec le développement de la Mécanique des Sols. Elle est maintenant très répandue dans certains pays d'Asie, aux Etats-Unis et en Europe, en particulier en Italie.

Les digues en terre ainsi édifiées, ne sont pas conçues suivant les mêmes critères que les grands barrages en terre compactée, quoique la mise en place des matériaux se fasse de la même façon. Les caractéristiques propres de ces ouvrages, sont les suivantes :

- leurs bassins versants ne dépassent jamais 500 à 1.000 ha et ils ne barrent en aucun cas, des cours d'eau importants,
- leurs hauteurs sont comprises entre 7 et 12m et ils ne dépassent que très rarement 15m,
- leurs capacités varient de 10.000 à 500.000 m³,
- leur construction doit utiliser le moins de béton possible,
- ils sont en général, édifiés en moins de 3 mois.

Depuis la recherche des sites jusqu'à la mise en oeuvre, toute cette technique est basée sur la Mécanique des Sols.

2 . La recherche des sites

Les sites possibles sont choisis, au départ, en fonction de critères topographiques, hydrologiques et géologiques. Il faut trouver une cuvette étanche, facilement obturable avec un bassin versant de faible superficie mais suffisamment alimenté. Le sol de la réserve doit être imperméable et les terrains avoisinants doivent pouvoir fournir les matériaux nécessaires à l'édification du remblai.

L'étude se fait d'abord à l'échelle de la petite région sur carte et stéréophotographies aériennes, avec les relevés pluviométriques et les débits des cours d'eau. Elle est suivie par une visite sur place d'un ingénieur spécialiste. Les critères de son choix dépendent alors directement de la Mécanique des Sols :

- obtention de la plus grande valeur possible du rapport : $\frac{\text{capacité de la retenue}}{\text{capacité du remblai}}$;
- bonnes fondations ;
- présence à moins de 500 m, d'une zone d'emprunt avec de bons matériaux ;
- étanchéité de la retenue ou possibilité de la réaliser par des moyens simples et économiques.

L'idéal est de pouvoir faire accompagner ce spécialiste, par un petit laboratoire mobile (véhicule tous terrains, très maniable) pouvant faire les analyses de définition et procéder à des essais rapides de perméabilité.

3 . Etude de l'emplacement et des matériaux

Une étude approfondie de la structure et des matériaux de la fondation et de la zone d'emprunt est toujours nécessaire.

a) La fondation

C'est une partie très importante de l'ouvrage et celle comportant le plus d'inconnues. Une fondation mauvaise entraine de très gros risques de ruine. Améliorer une mauvaise fondation nécessite toujours des aménagements coûteux. Quels sont les critères d'une bonne fondation ?

- Elle doit être capable de résister aux efforts de cisaillement dus au poids de l'ouvrage;
- Elle ne doit pas présenter des tassements trop accusés ;
- Elle doit être suffisamment imperméable pour éviter toute infiltration pouvant entrainer des sous-pressions importantes et des risques de "renards" (érosion souterraine régressive).

Des sondages sont toujours nécessaires,sauf dans le cas rarissime où l'on trouve, sous la terre végétale, le rocher franc. Ils sont menés jusqu'à une profondeur moyenne égale à la hauteur du barrage. On emploie pour ces sondages, des tarières à main et des sondeuses motorisées légères. La tarière ne donne que des échantillons remaniés sur lesquels on peut faire uniquement des essais d'identification. L'obtention d'échantillons non remaniés pouvant être soumis à des essais mécaniques, nécessite des outils spéciaux dont la mise en oeuvre est onéreuse. Mais cela est seulement nécessaire si l'on a des craintes sérieuses sur les propriétés mécaniques des couches profondes. Bien souvent on se contente d'explorer les couches de surface au moyen d'une tranchée au fond de laquelle sont prélevés les échantillons intacts non remaniés.

La perméabilité peut s'évaluer très rapidement "in situ" au moyen d'un matériel rustique (méthode du trou de la tarière). Il existe toutefois des appareils modernes pouvant donner directement sur le terrain, un grand nombre de renseignements sur la perméabilité et les propriétés mécaniques des couches profondes (pressio-perméamètres). De la valeur de la perméabilité, on déduira l'ordre de grandeur du débit de fuite à travers le fond de la cuvette.

Les principaux matériaux de fondation sont : le rocher, les sables et graviers, les argiles et vases.

i) Le rocher . Il ne pose en général pas de problème, sauf s'il est fissuré. Dans ce cas, il faut ou bien dégager jusqu'à la roche saine, ou bien traiter par injection de ciment. Mais ces opérations sont en général coûteuses.

ii) Sables et graviers . Leur résistance mécanique est bonne, mais leur perméabilité est souvent trop forte. Les méthodes employées pour les ouvrages importants telles que, rideau de palplanches, injections de ciment, paroi continue de béton, sont ici trop onéreuses.

On peut diminuer les fuites en augmentant la longueur des lignes de courant, ceci, en recouvrant le sol à l'amont de l'ouvrage avec une couche de matériaux imperméables en continuité avec les parties imperméables du barrage. Les sables peuvent également être imperméabilisés par traitement à la bentonite. Une autre solution moderne consiste à revêtir le fond de la réserve d'une couche bitumineuse ou d'un voile plastique, mais elle est coûteuse et valable uniquement pour les toutes petites retenues.

Les couches perméables en profondeur, sont également justiciables de contreforts drainants et de puits de décompression.

iii) Argiles et vases . Ce type de fondation est fréquent. L'imperméabilité est alors assurée, mais la résistance mécanique est faible et les tassements risquent d'être importants.

Il faut,de toute façon, toujours enlever les couches de surface les plus mauvaises et, quand le terrain sous jacent est saturé, le drainer pour permettre la consolidation durant la construction.

Une résistance mécanique trop faible, obligera à diminuer les pentes des parements. La présence, en quantité importante de vase molle et de tourbe, interdit toute possibilité de construction.

b) Les matériaux de la zone d'emprunt

Ils doivent offrir des propriétés physiques et mécaniques convenables et se présenter en quantités suffisantes. Les évaluations des cubages disponibles doivent toujours être assorties d'importants coefficients de sécurité. De nombreux échantillons sont à prélever aux fins d'identification et il faut vérifier l'homogénéité de la couche. Une couche bien homogène est idéale car elle permet l'extraction directe par strates horizontales. Des couches hétérogènes nécessitent par contre des reprises et mélanges. Les échantillons sont toujours prélevés remaniés puisque de toute façon les terres seront ensuite compactées.

Le matériau le plus intéressant est l'argile sableuse qui est imperméable et résistante. Les sables peuvent être utilisés, certains devenant presque imperméables après compactage. L'argile est moins résistante et la permanence de sa cohésion est sujette à caution. Elle peut être utilisée comme noyau imperméable dans les barrages à zones. Il existe des grilles granulométriques indiquant par simple lecture, si un sol convient.

c) Les essais à réaliser sur les échantillons

Les échantillons de la zone d'emprunt et de la fondation sont d'abord soumis aux essais de définitions c'est-à-dire la granulométrie et les limites d'Atterberg.

On détermine également la perméabilité et, pour les terres de remblai les caractéristiques de compactage. Il s'agit là d'essais relativement rapides, facilement réalisables dans un laboratoire mobile. Ces essais sont bien souvent suffisants pour les petits ouvrages et beaucoup d'ingénieurs en déduisent, par relations statistiques, les propriétés mécaniques.

Un tel procédé est très économique mais demande, pour être sûr, une grande expérience. Il faut éviter toute transposition hâtive et avant d'utiliser ce procédé, bien connaitre les sols de la région où l'on travaille. Si l'on a le moindre doute, on doit procéder aux essais mécaniques classiques : résistance au cisaillement et compressibilité.

Pour les toutes petites digues, inférieures à 7 m, seules les mesures d'identification sont nécessaires.

4 . La conception et le projet

Pour des raisons de prix, on préfèrera les ouvrages de type homogène, avec filtre amont et drain de pied aval, qui sont les plus faciles à mettre en oeuvre. Ils pourront parfois être du type à zones.

Le travail essentiel du projeteur est de déterminer la section transversale offrant la plus grande sécurité possible, compatible avec l'économie.

a) Pente des parements

On trouve, dans les manuels de Mécanique des Sols des tableaux donnant en fonction des caractéristiques de définition des sols et de la hauteur des ouvrages, la pente correspondante des parements. Ces tableaux sont très utiles pour dessiner directement les sections transversales des petites digues. Mais dès que l'on dépasse 7 m il vaut mieux faire une évaluation même rapide de la sécurité, par le calcul. La méthode la plus employée est celle, classique, de Fellenius. Le coefficient de sécurité S donné, représente le rapport entre les forces maintenant le parement en place et celles ayant tendance à le faire s'écrouler.

$$S = \frac{C\,L + \operatorname{tg}\phi\,\Sigma\,(N - U)}{\Sigma\,T}$$

C = cohésion , L = longueur du cercle de rupture , ϕ = angle de résistance au cisaillement , N et T = forces normales et tangentielles dans chaque tranche , Σ = signe de sommation à toutes les tranches , U = pression interstitielle.

Le calcul est toujours fait dans le cas, le plus défavorable, de la vidange rapide. Le coefficient de sécurité ne doit pas, en principe être inférieur à 1,4 , 1,5. Il existe d'ailleurs des méthodes plus élaborées que celle de Fellenius, mais les incertitudes sur les propriétés mécaniques et leur évolution, l'homogénéité des matériaux, l'évaluation de la pression interstitielle, leur enlève beaucoup d'intérêt.

En fait, pour les petits ouvrages, sauf cas exceptionnel, la sécurité est toujours largement assurée. Il est d'ailleurs toujours facile de l'augmenter en adoucissant légèrement les pentes des parements. ce qui n'est jamais très coûteux.

b) Protection et filtre amont

La protection contre l'érosion et les vagues, consiste habituellement en des enrochements en vrac ou en un perré appareillé. On emploie aussi les bétons bitumineux et des dalles de béton ordinaire non jointives. En dessous, un filtre protège les matériaux fins du remblai et empêche leur entrainement par l'eau lors d'une vidange rapide.

c) Drain de pied aval

Ce drain a pour but de rabattre la ligne d'eau interne pour empêcher les suintements et les érosions sur le parement aval. Il est calculé suivant la classique règle des filtres.

d) Infiltrations à travers le barrage

Le débit de fuite s'évalue à partir du coefficient K de Darcy et du dessin dans une section droite du réseau des lignes d'écoulement et des équipotentielles. Ce dessin peut, en général, s'établir directement dans les cas simples.

5 . Edification et Contrôle de chantier

Une édification correcte est indispensable. La terre est disposée couche par couche et compactée par des rouleaux à pieds de mouton ou à pneumatiques à gros dessins. Le contrôle de chantier, strict, doit faire respecter les cotes géométriques du projet et la mise en place des terres suivant les normes données par le laboratoire. Le sol doit être compacté au taux d'humidité optimal et à sa densité sèche maximale (optimum Proctor). On détermine sur une aire d'essai, avant la mise en route du chantier, le nombre de passages du rouleau nécessaire.

Ces contrôles sont faits par un petit laboratoire mobile. Le taux d'humidité est déterminé par dessèchement et pesée. La densité est mesurée au densitomètre à membrane ou évaluée au pénétromètre. Des appareils modernes mesurent la densité par absorption des rayons gamma et le taux d'humidité par la diffusion des neutrons rapides. Ils sont très commodes mais onéreux et nécesaitent des étalonnages fréquents ; ils peuvent également être dangereux en cas d'accident.

6 . Les crues et la submersion

Une submersion prolongée détruit à coup sûr tout barrage en terre construit suivant les techniques actuelles. Pour éviter ce danger, un bon évacuateur de crue est nécessaire. Son étude sortirait du sujet. En fait, pour diminuer les débits de crue et les apports solides, le mieux est de réduire au maximum les bassins versants.

Il existe toutefois des cas où un barrage submergé n'a pas été entièrement détruit. Tout dépend ici, du rapport entre l'énergie nécessaire pour détruire la digue et celle accumulée dans l'eau sous forme potentielle. Si la retenue se vide plus vite que le barrage ne s'érode, il se formera seulement une ou plusieurs fentes en V dans l'ouvrage. Si la réserve est vaste, tout risque alors d'être emporté. L'argile compactée est le matériau le plus résistant à l'érosion.

Une submersibilité même limitée serait du plus grand intérêt, en particulier dans les régions où l'on a peu de données hydrologiques.

Pour permettre cette submersibilité, il faudrait former à la surface de l'ouvrage une couche souple et imperméable (le bitume convient bien mais est trop cher). Des recherches vont être entreprises dans ce sens.

7 . Conclusion

La Mécanique des Sols intervient par ses concepts, ses procédés de calculs, ses essais et ses recherches à tous les stades de l'édification des petits barrages en terre. Ceux-ci doivent toujours être étudiés et réaliser avec grand soin malgré leur faible importance. Il y a peu de progrès à attendre du raffinement des calculs et des essais. Il faut plutôt chercher à diminuer les coûts d'étude et de réalisation par l'emploi de méthodes nouvelles.

La sécurité ne doit en aucun cas être compromise. La notion de risque doit ici servir de guide. Des petits ouvrages dont la rupture n'aurait que des conséquences matérielles limitées peuvent être édifiés après des études sommaires. Leur rentabilité peut d'ailleurs se chiffrer d'après leur probabilité de destruction à plus ou moins brève échéance.

Pour des barrages plus importants dont la rupture entrainerait des pertes en vies humaines, il faut être beaucoup plus prudent et utiliser toutes les ressources de la Mécanique des Sols dans la conception et la réalisation.

La structure des petits barrages en terre évoluera sans doute dans l'avenir. Des composés chimiques capables d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols vont apparaître à des prix intéressants. Les petits ouvrages, du fait de leurs cubages peu importants pourront rapidement en bénéficier. Le remblai compacté deviendra de plus en plus un produit manufacturé.

8 . Bibliographie

- BUREAU OF RECLAMATIONS ,"Design of small dams", U.S. Government print. office Washington 1960
- TAYLOR D.W. ,"Fundamentals of soils Mechanics", J. Wiley , New-York , 1948
- TERZAGHI K. ,"Soil Mechanics in Engineering practice", J. Wiley , New-York , 1948
- BISHOP , The International Journal of soils Mechanics "Stability coefficients for Earth Slopes" - Géotechnique , Londres , Décembre 1960.
- "BULLETIN TECHNIQUE DU GENIE RURAL n° 53", C.R.E.G.R. Antony (Seine) Octobre 1961.

285 F - Oct.1962 - 1,000